

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.06.023

不同固体润滑填料对聚四氟乙烯性能的影响

裴高林, 李红波, 苏正涛

(中国航发减振降噪材料及应用技术重点实验室, 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 分别以体积分数均为 25% 的石墨 (Gr)、二硫化钼 (MoS_2)、氮化硼 (BN) 和氟化石墨 (FG) 四种固体润滑剂为填料, 通过混料-冷压-烧结工艺制备了四种改性聚四氟乙烯 (PTFE) 材料, 对比研究了材料的力学性能、导热性能和摩擦磨损性能。结果表明: 四种填料均会使得 PTFE 的拉伸强度和断裂伸长率下降, 压缩弹性模量、压缩强度和硬度上升; Gr 填充的 PTFE 热导率最高, 耐磨损性能最为突出, 体积磨损率比纯 PTFE 降低了 2 个数量级, 且摩擦系数仅为 0.19; MoS_2 填充的 PTFE 形成的转移膜最为均匀和致密, 摩擦系数较纯 PTFE 略有升高, 但数据波动性较小; BN 填充的 PTFE 摩擦系数仅为 0.17, 但拉伸性能较差; FG 虽然可以降低 PTFE 的摩擦系数, 但改善耐磨损性能的效果较差; 四种改性材料摩擦系数均低于 0.25, 说明四种润滑填料均可以使 PTFE 保持良好低摩擦特性。

关键词: 聚四氟乙烯; 固体润滑剂; 摩擦磨损性能; 拉伸性能; 压缩性能; 密封材料

中图分类号: TQ325.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)06-0122-06

Effect of Solid Lubricant Fillers on the Performance of PTFE

Pei Gaolin, Li Hongbo, Su Zhengtao

(Aviation Science and Technology Key Laboratory of Vibration Noise Reduction Materials and Application Technology,
AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: Four modified polytetrafluoroethylene (PTFE) materials with 25% of graphite (Gr), molybdenum disulfide (MoS_2), boron nitride (BN) and fluorinated graphite (FG) as solid lubricant fillers were prepared by mixing, cold pressing and sintering progress. The mechanical properties, thermal conductivity and tribological properties of modified PTFE materials were studied. The results show that: Four kinds of fillers decrease the tensile strength and elongation at break of PTFE, and increase the compressive modulus, compressive strength and hardness. PTFE with graphite has the highest thermal conductivity and the most outstanding wear resistance. The volume wear rate is 2 orders of magnitude lower than that of pure PTFE, and the friction coefficient is only 0.19. Molybdenum disulfide filled PTFE has the most uniform and dense transfer film on the surface of the steel ring, with a slightly higher friction coefficient than pure PTFE, but the data has less fluctuation. The friction coefficient of boron nitride filled PTFE is only 0.17, but its tensile property is poor. Although fluorinated graphite can reduce the friction coefficient of PTFE, the effect of improving the wear resistance is poor. The friction coefficients of the four modified PTFE materials are all lower than 0.25, which means that all four kinds of lubricating fillers can maintain the good low friction characteristics of PTFE.

Keywords: polytetrafluoroethylene; solid lubricants; tribological property; tensile property; compression property; sealing material

相比于单一橡胶材料制备的密封圈, 由聚四氟乙烯 (PTFE) 环与橡胶圈复合制备而成的组合式密封件, 由于能够适应更高的密封压力、运转速度和使用温度, 已在国外成功应用于飞机的液压与气动系

统中^[1-2]。纯 PTFE 承载能力低、耐磨损性能较差且易“冷流”, 单独作为动密封部件时极易产生泄露进而造成密封失效, 因此组合式密封件中所用 PTFE 通常为经有机或无机填料改性后的材料^[3]。常用填

通讯作者: 李红波, 硕士, 工程师, 主要从事高性能橡胶与密封材料的研究 E-mail: 18801329406@163.com

收稿日期: 2020-04-07

引用格式: 裴高林, 李红波, 苏正涛. 不同固体润滑填料对聚四氟乙烯性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(6):122-127.

Pei Gaolin, Li Hongbo, Su Zhengtao. Effect of solid lubricant fillers on the performance of PTFE[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(6):122-127.

料可分为短切纤维(碳纤维、玻璃纤维)、耐高温聚合物(聚苯酯、聚酰亚胺)、金属粉末(铜粉)、固体润滑填料[石墨(Gr)、二硫化钼(MoS_2)、纳米氧化物(二氧化硅、三氧化二铝)、新型碳材料(石墨烯、碳纳米管)等^[3-7]。

固体润滑剂是一类为防止与保护摩擦表面在作相对运动时免于损坏及降低摩擦系数而在表面上使用的粉末状或薄膜状物质^[8-10]。PTFE, MoS_2 , Gr、氮化硼(BN)、氟化Gr(FG)均可视为固体润滑剂。其中, PTFE, MoS_2 , Gr, BN 较为常见; FG 则是一种新型润滑材料, 其由氟气与 Gr 在一定压力和温度下反应制得, 元素组成为 C, F, 原子占比依据氟化度而定, 润滑性能优于通用的 Gr 和 MoS_2 ^[11]。在聚合物的改性研究中, 加入该类软质的固体润滑填料可改变材料的界面性能, 进而显著提升聚合物的耐磨损性能^[12]。目前, 以 BN, FG 为填料对 PTFE 进行改性的研究还少有报道。

开发国产的新型航空液压组合式密封件, 需研制高耐磨、低摩擦、抗蠕变、高导热的改性 PTFE 材料, 笔者所在团队先前曾研究过含有硅烷偶联剂改性硅灰石或 P84NT2 耐高温聚酰亚胺等硬质填料体系填充的 PTFE 材料, 发现该类硬质填料可明显提升 PTFE 的耐磨损性能和抗蠕变性能^[13-16]。为挑选性能优良的软质润滑填料与硬质填料复配, 以制备高耐磨 PTFE 复合材料, 笔者以 Gr, MoS_2 , BN, FG 四种固体润滑剂为填料, 通过混料-冷压-烧结工艺制备了 PTFE 复合材料, 对比研究了复合材料的摩擦磨损性能、拉伸性能、压缩性能及导热性能, 具有一定的应用价值。

1 实验部分

1.1 主要原材料

Gr: 602050, 平均粒径 $5\ \mu\text{m}$, 南京吉仓纳米科技有限公司;

MoS_2 : 平均粒径 $5\ \mu\text{m}$, Climax 公司;

BN: H-BN-E, 平均粒径 $5\ \mu\text{m}$, 天元化工研究所股份有限公司;

FG: 含氟量 65%, 平均粒径 $5\ \mu\text{m}$, 北京德科岛金有限公司;

PTFE: M18F, 大金工业株式会社。

图 1 为四种固体润滑填料的微观形貌图。

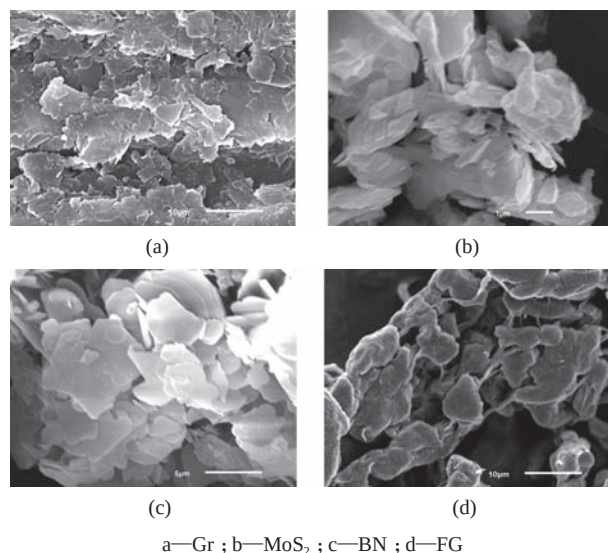


图 1 四种固体润滑填料的微观形貌图

1.2 主要设备及仪器

高速混合机: FM-MIXER100 / 1 型, 日本焦炭工程公司;

油压成型机: COSMOS CMHF-100S 型, 大同机械有限公司;

高温气氛炉: GF14Q 型, 博蕴通公司;

电子拉力机: Instron3366 型, 英斯特朗公司;

导热系数测定仪: TC3000 型, 西安夏溪公司;

密度分析天平: MS104TS / 00 型, 梅特勒-托利多公司;

摩擦磨损试验机: MRH-1 型, 济南益华公司;

邵氏硬度计: LX-D 型, 上海精密仪器仪表有限公司;

扫描电子显微镜: JSM-7500F 型, 日本 JEOL 公司。

1.3 试样制备

将 PTFE 粉末与干燥的填料按 75 : 25 的比例(体积比)称量好, 放入高速混合机料腔中混合均匀。取出粉料, 于室温下静置 1 天后转移至预成型模具中, 利用液压成型机以 55 MPa 的压力压制 30 ~ 40 min。冷压结束, 将预成型体取出并静置 3 h 以上, 然后转移至高温气氛炉中, 以 $60^\circ\text{C}/\text{h}$ 的速率升温至 365°C , 以氮气为保护气体高温烧结 4 ~ 5 h, 然后以 $50^\circ\text{C}/\text{h}$ 的降温速率降至室温。烧结完成后的坯料经机械加工, 制成各种测试所需试样。

1.4 性能测试

拉伸性能: 参照标准 ASTM D638-2014, 试样为该标准中规定的 V 型哑铃形状试样, 测试时的加

载速率为 20 mm/min。

压缩性能: 参照 ASTM D 695-2010, 测试样品为标准中规定的压缩模量试样, 尺寸为 12.7 mm × 12.7 mm × 50.8 mm, 压缩速度为 1.3 mm/min。压缩模量 E_c 按照公式 (1) 取值, 其中 $\sigma_{0.01}$ 和 $\sigma_{0.015}$ 为试样在变形量分别为 1% 和 1.5% 时的压缩应力。

$$E_c = \frac{\sigma_{0.01} - \sigma_{0.015}}{0.005} \times 100\% \quad (1)$$

硬度: 参照 ASTM D2240-2015, 硬度计压头为邵氏 D 型, 测试样品尺寸为 30 mm × 30 mm × 6 mm。

摩擦磨损性能: 参照 GB/T3960-2016, 采用环-块摩擦磨损测试模式, 施加法向载荷为 200 N, 对磨铁环转速为 200 r/min, 试样尺寸为 30 mm × 7 mm × 6 mm, 实验时间为 1 h, 室温干摩擦。其中, 摩擦系数 f 取实验后半段时间内的平均值, 体积磨损率 ω 根据公式 (2) 计算。

$$\omega = \frac{B}{L \times P} \left[R^2 \arcsin\left(\frac{b}{2R}\right) - \frac{b}{2} \sqrt{R^2 - \frac{b^2}{4}} \right] \quad (2)$$

导热性能: 使用导热系数测量仪以两板法进行测试, 试样尺寸为 30 mm × 30 mm × 4 mm, 采集电压 1.5 V, 采集时间 5 s, 重复采集数据五次, 测试结果取平均值。

SEM 分析: 将摩擦试样和摩擦钢环表面作喷金处理, 然后放置于扫描电镜下, 放大至 50 ~ 2000 倍以观察微观形貌。

2 结果与讨论

2.1 固体润滑填料对 PTFE 拉伸性能的影响

图 2 为几种填充 PTFE 材料的拉伸强度和断裂伸长率。由图中可知, 不含填料的纯 PTFE 的拉伸性能最好, 拉伸强度为 68.1 MPa, 断裂伸长率为 388%。含填料的 PTFE 拉伸性能明显恶化, 拉伸强度由大到小分别为: PTFE/FG (56.4 MPa), PTFE/MoS₂ (32.1 MPa), PTFE/Gr (30.2 MPa), PTFE/BN (14.1 MPa), 其中含有 Gr 和 MoS₂ 的 PTFE 还出现了断裂伸长率明显降低的现象。PTFE 卓越的耐腐蚀性来源于其 C—F 键高度的化学稳定性, 但是 C—F 键高度的稳定性也使得填料很难与 PTFE 树脂基体之间产生化学反应。因此, 当使用 Gr, MoS₂, BN 等固体润滑填料添加到 PTFE 中时, 一方面填料与树脂之间难以形成有效连接, 在拉伸过程中填料与树脂基体间容易脱粘 (如图 3 所示); 在另一

方面, 由于这三种片层结构的填料单片层间的作用力极其微弱, 当拉伸应力垂直或平行于片层的方向时, 片层之间容易相互分离, 不能有效传递载荷, 因此 PTFE 的拉伸性能急剧下降, 其中用 BN 填充的 PTFE 力学性能下降最为明显。但是对于 FG 而言, 其含有 C—C 键和 C—F 键, 化学结构与 PTFE 接近, 与树脂基体的相容性较好, 烧结时容易与树脂很好熔结在一起, 因此含有 FG 的 PTFE 拉伸强度较高, 断裂伸长率也较大 (320%)。

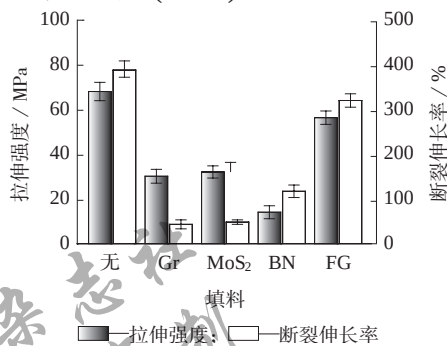
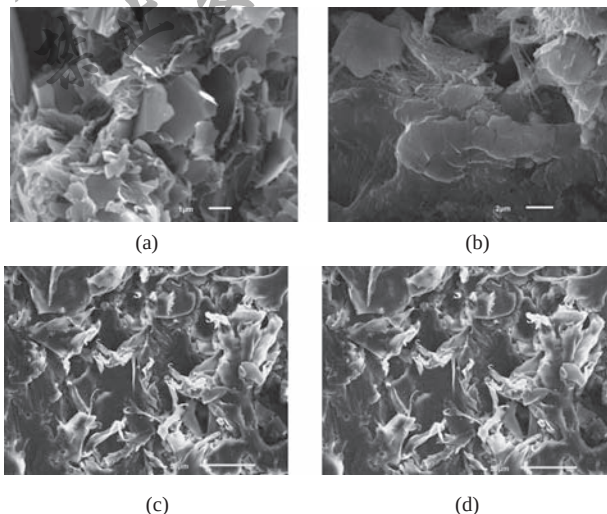


图2 不同固体润滑填料时 PTFE 拉伸性能



a—PTFE/Gr; b—PTFE/MoS₂; c—PTFE/BN; d—PTFE/FG

图3 拉伸断口形貌

2.2 固体润滑填料对 PTFE 压缩性能的影响

虽然固体润滑填料的加入, 使得 PTFE 的拉伸性能明显下降, 但是却显著提升了 PTFE 的压缩弹性模量和压缩强度见表 1。由表 1 可知, 纯 PTFE 的压缩弹性模量为 350 MPa, 5% 压缩强度为 10.51 MPa; 而含有 Gr, MoS₂, BN, FG 的 PTFE, 压缩弹性模量分别为 511, 503, 449, 384 MPa, 5% 压缩强度分别为 16.41, 17.46, 13.11, 11.06 MPa。在压缩过程中, 材料整体的形变量较小, 填料的加入可以传递载荷, 并且可以有效限制大分子链之间的滑

移,起到了一定的物理镶嵌作用,因此 PTFE 抵抗压缩形变的能力明显提升。压缩强度和压缩弹性模量的提升也使得材料的硬度明显增大。纯 PTFE 的硬度为 57,含有 Gr, MoS₂, BN, FG 的 PTFE 硬度分别为 63,65,61,59。

表 1 固体润滑填料填充 PTFE 的压缩强度、硬度和密度

材料	PTFE	PTFE/ Gr	PTFE/ MoS ₂	PTFE/ BN	PTFE/ FG
1% 压缩强度 /MPa	2.66	7.96	7.37	6.75	2.45
5% 压缩强度 /MPa	10.51	16.41	17.46	13.11	11.06
10% 压缩强度 /MPa	13.87	19.87	17.78	14.83	14.05
压缩弹性模量 /MPa	350	511	503	449	384
硬度	57	63	65	62	59
密度 / (g · cm ⁻³)	2.17	2.20	2.82	2.19	2.24

2.3 固体润滑填料对 PTFE 导热性能的影响

纯 PTFE 的导热性能较差,热导率仅为 0.25 W/(m · K),见表 2。加入体积分数为 25% 的几种固体润滑填料后热导率均有一定程度的提高,提升程度的高低主要与填料的导热特性有关。Gr 作为典型的导热填料,其填充的 PTFE 导热性能最好,热导率上升为 2.34 W/(m · K),比纯 PTFE 提高了一个数量级。BN 也是一种导热性能良好的非金属材料,其填充的 PTFE 热导率也明显上升,为 1.49 W/(m · K)。MoS₂ 填充的 PTFE 热导率也有一定程度的提升,为 1.02 W/(m · K)。而 FG 的化学组成与 PTFE 相似,其填充的 PTFE 热导率仅为 0.31 W/(m · K),轻微的上升可能是由于少部分 Gr 并未氟化彻底。

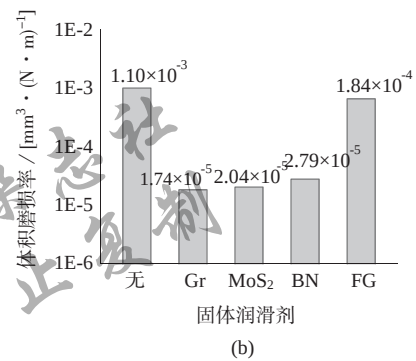
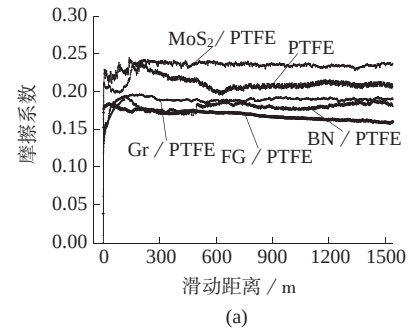
表 2 固体润滑填料填充 PTFE 的热导率

性能	PTFE	PTFE/ MoS ₂	PTFE/ Gr	PTFE/ BN	PTFE/ FG
热导率 / [W · (m · K) ⁻¹]	0.25	1.02	2.34	1.49	0.31

2.4 固体润滑填料对 PTFE 摩擦磨损性能的影响

图 4 为固体润滑填料填充 PTFE 的摩擦系数和体积磨损率。如图 4 所示,纯 PTFE 的摩擦系数约为 0.21,体积磨损率高达 $1.1 \times 10^{-3} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,耐磨损性能较差。加入固体润滑填料(体积分数均为 25%)后,PTFE 的体积磨损率出现明显下降。含有 Gr 的 PTFE 耐磨损性能较为突出,体积磨损率降低至 $1.74 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,摩擦系数也降低为 0.19;含有 MoS₂ 的 PTFE 体积磨损率降低至 $1.84 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,摩擦系数虽上升为 0.23,但其摩擦系数曲线波动性较小;含有 BN 的 PTFE 体积磨损率降低至 $2.79 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,摩擦系数也降低为 0.17;含有 FG 的 PTFE 体积磨损率

下降幅度较小,但摩擦系数仅为 0.16,下降幅度较大。由于四种改性材料的摩擦系数均低于 0.25,意味着四种固体润滑填料都可使 PTFE 维持良好的低摩擦特性。



a—摩擦系数;b—体积磨损率

图 4 固体润滑填料填充 PTFE 的摩擦系数和体积磨损率

2.5 磨痕及转移膜形貌分析

Gr, MoS₂ 与 BN 三种填料均具有片层状的晶体结构,层间通过微弱的范德华力连接。在摩擦过程中,三种填料均容易脱出并转移至对磨的钢环表面,并逐渐形成转移膜(如图 5 所示)。由于片层间易受到剪切作用而发生滑移,因此三种填料可以对基体起到良好的润滑与保护作用,进而显著提升了 PTFE 的耐磨损性能。

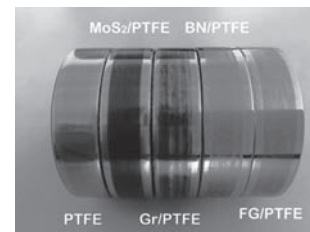
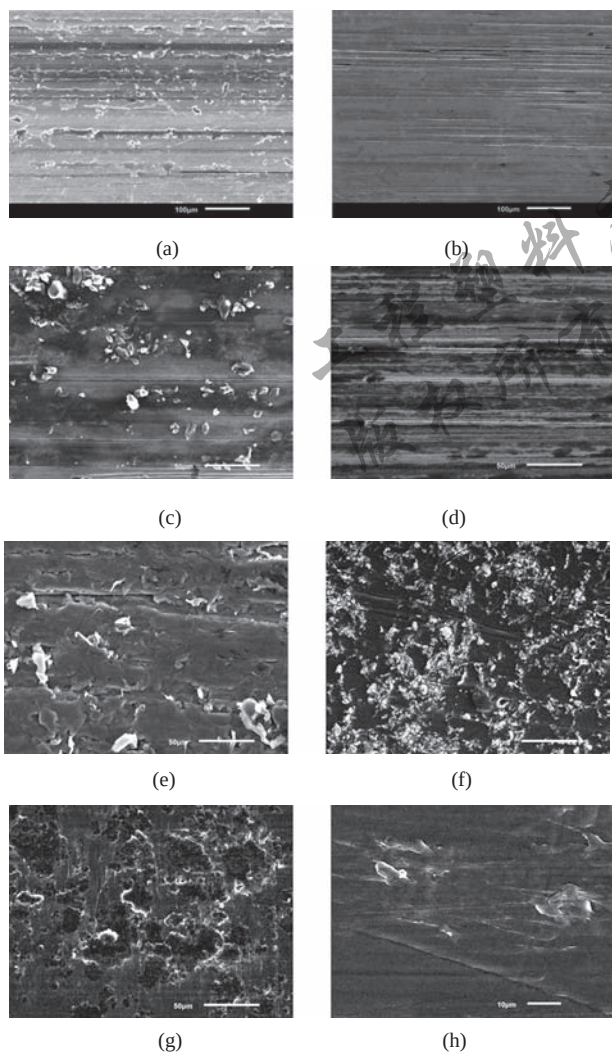


图 5 在对磨钢环表面形成的 PTFE 转移膜照片

无论是宏观照片还是微观形貌(如图 6),PTFE/MoS₂ 形成的转移膜都最为均匀且致密,这解释了其摩擦系数曲线为何比较平稳。PTFE/Gr 的转移膜上有许多 Gr 碎片,转移膜的致密程度不及 PTFE/MoS₂,但是 PTFE/Gr 摩擦系数较低,且热导率最

高,这在一定程度上减弱了摩擦热的积累对树脂基体的软化和破坏作用,因此其体积磨损率也较低。PTFE/BN的转移膜上附着有许多PTFE颗粒,说明PTFE/BN在摩擦过程中发生了一定程度的黏着磨损,因此其磨损率要比PTFE/MoS₂和PTFE/Gr高。PTFE/FG形成的转移膜不够光滑,且存在大量缺陷,同时其磨痕表面出现明显的“犁沟”,这是由于其硬度较低,承载能力差,钢环表面的微小凸起容易嵌入其内部,使其在摩擦过程中发生严重的磨粒磨损,因此其体积磨损率较大,耐磨损性能较差。但是耐磨损性能差意味着在摩擦过程中会有更多的FG会从基体中释放出来,因此PTFE/FG的摩擦系数较低。



转移膜: a—PTFE/Gr; b—PTFE/MoS₂; c—PTFE/BN; d—PTFE/FG
磨痕: e—PTFE/Gr; f—PTFE/MoS₂; g—PTFE/BN; h—PTFE/FG

图6 固体润滑填料填充PTFE的磨痕及转移膜微观形貌

一般而言,材料在对磨铁环上形成的转移膜越

致密、越均匀、越薄,其摩擦系数越低。但是通过磨痕和转移膜还不能完全解释含有不同种固体润滑填料的PTFE摩擦系数的高低。PTFE/MoS₂形成的转移膜最为致密,但是摩擦系数却是这几种材料中最高的;而PTFE/FG的转移膜缺陷最多,摩擦系数却最低。这样的现象说明决定几种材料摩擦系数高低的因素不完全在于转移膜的形态。FG分子间作用力微弱,而片状材料Gr, MoS₂与BN单片层之间的范德华力也十分微弱,几种复合材料摩擦系数的不同,很有可能与其分子间作用力或者片层间的范德华力的大小有关。在一定的温度、压力、滑动速度、介质条件下,这种作用力越弱,固体润滑填料材料在受到剪切作用时越容易滑移,润滑性能也就越好,形成的PTFE复合材料的摩擦系数也就越小。就整体而言,四种固体润滑填料都可以使得PTFE维持良好的低摩擦特性。

3 结论

(1) 由于PTFE的化学惰性,树脂基体与填料之间不能形成有效的化学键连接,因此四种固体润滑填料的加入都使得PTFE的拉伸性能明显下降,其中BN填充的PTFE拉伸强度最低。

(2) 填料可以传递压缩载荷,并且能够有效的限制大分子链之间的滑移,起到一定的物理镶嵌作用,因此PTFE压缩弹性模量、压缩强度、硬度明显提升。

(3) 纯PTFE导热性能较差,加入四种固体润滑填料后,热导率均有一定程度的上升,其中含有Gr的PTFE热导率最高。

(4) 加入含量为25%的四种固体润滑填料均可以在一定程度上降低PTFE的体积磨损率,同时维持其良好的低摩擦特性。其中,Gr填充的PTFE耐磨损性能最好,FG填充的PTFE摩擦系数较低,MoS₂填充的PTFE形成的转移膜最为均匀和致密。

(5) 在四种填料体积分数均为25%的条件下,Gr填充的PTFE拉伸强度为30.2 MPa,热导率为2.34 W/(m·K),摩擦系数为0.19,体积磨损率较纯PTFE提高了2个数量级,综合性能较好。

参考文献

- [1] 佚名. 设备供应商[J]. 航空维修与工程, 2017(4):11.
- [2] None. Equipment suppliers[J]. Aviation maintenance & engineering, 2017(4):11.
- [2] 蔡仁良. 流体密封技术: 原理与工程应用[M]. 北京: 化学工业

- 出版社,2013:402-519.
- Cai Renliang. Fluid sealing technology: Principles and engineering applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press,2013:402-519.
- [3] 钱知勉,包永忠. 氟塑料加工与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2010:50-209.
- Qian Zhimian, Bao Yongzhong. Processing and application of fluoroplastics[M]. Beijing: Chemical Industry Press,2010:50-209.
- [4] Gong R, Liu M, Zhang H, et al. Experimental investigation on frictional behavior and sealing performance of different composites for seal application[J]. Wear,2015,342:334-339.
- [5] 张付宝. 填充改性聚四氟乙烯复合材料研究进展[J]. 有机氟工业,2017(3):55-58.
- Zhang Fubao. Research progress of filled PTFE composites[J]. Organo-Fluorine Industry,2017(3):55-58.
- [6] Krick B A, Pitenis A A, Harris K L, et al. Ultralow wear fluoropolymer composites:nanoscale functionality from microscale fillers[J]. Tribology International,2016,95:245-255.
- [7] 侯天武,李秉轲,颜华,等. 聚醚醚酮及其复合材料摩擦性能研究进展[J]. 科技资讯,2018,16(5):102-104.
- Hou Tianwu, Li bingke, Yan Hua, et al. Research progress on friction properties of polyetheretherketone and its composites[J]. Science & Technology Information,2018,16(5):102-104.
- [8] Scharf, T W, Prasad, S V. Solid lubricants:a review[J]. Journal of Materials Science,48(2):511-531.
- [9] H. E. Sliney. Solid lubricant materials for high temperatures—A Review[J]. Tribology International,1982,15(5):303-315.
- [10] 谢凤,朱江. 固体润滑剂概述[J]. 合成润滑材料,2007(1):31-33.
- Xie Feng, Zhu Jiang. Briefly review of solid lubricants[J]. Synthetic Lubricants,2007(1):31-33.
- [11] 张亮,张红梅,万伟华,等. 氟化石墨材料的改性及其电化学性能研究[J]. 电化学,2018,24(4):385-391.
- Zhang Liang, Zhang Hongmei, Wan Weihua, et al. Modifications and electrochemical properties of graphite fluoride[J]. Journal of Electrochemistry,2018,24(4):385-391.
- [12] 林启权,毛波,董文正,等. 二硫化钼与二硫化钨填充改性聚四氟乙烯的摩擦磨损性能[J]. 高分子材料科学与工程,2016,32(11):51-57.
- Lin Qiquan, Mao Bo, Dong Wenzheng, et al. Tribological behaviour of polytetrafluoroethylene composites modified with molybdenum disulfide and tungsten disulfide[J]. Polymeric Materials Science and Engineering,2016,32(11):51-57.
- [13] 索军营,闵雅兰,潘剑锋,等. 针状硅灰石填充 PTFE 密封材料的性能[J]. 工程塑料应用,2018,46(8):12-17.
- Suo Junying, Min Yalan, Pan Jianfeng, et al. Performance of acicular wollastonite filled PTFE sealing material[J]. Engineering Plastics Application,2018,46(8):12-17.
- [14] 李红波,苏正涛,杨睿,马绪强. 硅灰石与石墨对聚四氟乙烯摩擦磨损性能的影响[J]. 中国塑料,2018,32(10):32-38.
- Li Hongbo, Su Zhengtao, Yang Rui, et al. Effect of wollastonite and graphite on friction and wear properties of polytetrafluoroethylene[J]. China Plastics,2018,32(10):32-38.
- [15] 徐时贤,李红波,苏正涛. 基于有限元分析方法的填充聚四氟乙烯磨损公式拟合[J]. 润滑与密封,2019,44(9):142-146.
- Xu Shixian, Li Hongbo, Su Zhengtao. Fitting of wear formula of filled PTFE based on finite element analysis method[J]. Lubrication Engineering,2019,44(9):142-146.
- [16] 李红波,赖亮庆,黄艳华,等. 聚酰亚胺填充聚四氟乙烯密封材料的性能[J]. 工程塑料应用,2019,47(11):30-35.
- Li Hongbo, Lai Liangqin, Huang Yanhua, et al. Performance of PI filled PTFE sealing materials[J]. Engineering Plastics Application,2019,47(11):30-35.